

УДК 004.085

П. С. Анікін¹, Є. В. Беляк²

¹Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, 69063 Запоріжжя, Україна

²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Застосування наноструктурованих люмінофорів у системах об'ємного оптичного запису

Проведено аналіз принципів організації систем об'ємного оптичного запису та синтезу реєструвальних середовищ на основі наноструктурованих піразолінових люмінофорів. Запропоновано математичну модель зчитування даних з багатошарового фотолюмінесцентного носія інформації. Розроблено систему оцінки параметрів запам'ятовуючого пристрою на основі систем об'ємного оптичного запису через співставлення параметрів архітектури системи та характеристик сигналу зчитування. Запропоновано алгоритм визначення оптимальних параметрів запам'ятовуючого пристрою через вирішення задачі пошуку екстремуму функції.

Ключові слова: оптичний запис інформації, багатошаровий фотолюмінесцентний носій, сигнал зчитування, паразитний сигнал, наноструктуровані люмінофори, піразолінові барвники, екстремум функції.

Вступ

При організації систем довгострокового збереження даних оптичний запис розглядається як найбільш перспективний підхід при побудові архівного носія інформації [1–6]. При оптичному записі інформація кодується у вигляді мікрорельєфних структур (носії типу «ROM») або мікророзмірних ділянок зі зміненими оптичними властивостями (носії типу «R» та «RW»), що є більш надійним засобом збереження даних ніж перемагнічування доменів (магнітний і магнітооптичний записи) або накопичення заряду на затворі польового транзистора (твердотільні носії).

Тим не менш, слід зазначити, що показники інформаційної ємності та швидкості зчитування даних, які характерні для сучасних оптичних носіїв, не відповідають зростаючим вимогам в області цифрового запису [4–8]. Це пов'язано з дифракційним обмеженням оптичного запису, що поєднує максимальне значення поверхневої щільності запису інформації зі значеннями довжини хвилі та числової

© П. С. Анікін, Є. В. Беляк

апертури оптичної системи. Вирішення даної проблеми лежить в області об'ємного оптичного запису, зокрема, це стосується методів побудови оптично прозорих і оптично однорідних багатошарових структур з фотолюмінесцентними інформаційними елементами інформаційних шарів [6, 7].

Дослідження, проведені з метою побудови багатошарових фотолюмінесцентних носіїв, вказали на задачі, які необхідно вирішити при розробці даного типу запам'ятовуючого пристрою [6–8], а саме: мала швидкість зчитування даних і низький рівень сигналу зчитування, що пов'язані з особливостями фотолюмінесцентного відгуку; високий рівень паразитного сигналу від інформаційних шарів, а також технічна складність вертикального позиціонування оптичної головки приводу. Для вирішення поставлених задач, окрім проведення експериментальних досліджень реєструвальних матеріалів і розробки математичного апарату та відповідних машинних алгоритмів, необхідно побудувати базові підходи аналізу багатошарового фотолюмінесцентного запису. З цією метою було запропоновано розробити комплексну математичну модель, що включає у себе всі можливі параметри фотолюмінесцентного носія та системи зчитування як аргументи цільових функцій, які характеризують ефективність об'ємного оптичного запису [7]. Дана модель дозволяє вивести задачу пошуку оптимального рішення при розробці носія інформації на рівень математичної задачі пошуку екстремуму цільової функції. Переваги даного підходу полягають в автоматизації процесу пошуку параметрів оптичної системи та оптичного носія.

Принципи побудови багатошарового фотолюмінесцентного носія

Структура багатошарового фотолюмінесцентного носія (РММ: Photoluminescent Multilayer Media) у загальному вигляді складається з інформаційних шарів у кількості N , розділених $(N - 1)$ проміжними шарами. Проміжні шари слугують для надійного розділення сигналу від інформаційних шарів, таким чином їхня товщина залежить від числової апертури оптичної системи зчитування [6–8].

Паразитний сигнал у даній оптичній системі виникає внаслідок того, що при фотолюмінесцентному (ФЛ) зчитуванні даних опромінюються та, відповідно, дають ФЛ-відгук усі інформаційні шари, а не тільки той, на якому сфокусовано лазерний промінь, що призводить до перехресних завад. Рівень для системи РММ є суттєво меншим ніж для носія з відбивальними шарами, але при великій ємності носія і, відповідно, значній кількості шарів амплітуда паразитного сигналу буде перевищувати амплітуду корисного сигналу. Але було зазначено, що за умов, коли товщина проміжних шарів є достатньо великою, на сусідніх інформаційних шарах опромінюються значні за розміром області, в яких розміщується велика кількість пітів, лендів і проміжків між доріжками, а інтенсивність сигналу від такого шару по відношенню до сигналу, що зчитується, складатиме в середньому той відсоток, що займають піти на поверхні шару по відношенню до загальної площі. Було запропоновано створити такі умови ФЛ-зчитування даних, за яких інтенсивність паразитного сигналу буде фіксованою величиною, що надасть змогу виділити корисний сигнал.

Як показав подальший аналіз, у загальному випадку значення сумарного паразитного сигналу, навіть за умови необхідної товщини проміжних шарів, не буде постійним [7, 8]. Основна причина цього полягає в тому, що інтенсивність опро-

мінення шарів, розташованих під шаром зчитування, буде різною залежно від того, сфокусовано промінь на ФЛ-піті чи на проміжку між пітами (лендами). З метою збільшення значення сигнал-шум (SNR) для РММ-носія було запропоновано кодування інформації виключно значенням довжини лендів. При зчитуванні інформації з області, що розташована біля межі зони запису інформаційного шару, область, яка опромінена лазерним світлом, на шарах поза шару зчитування буде частково виходити за межі зони запису. Це призведе до зменшення інтенсивності паразитного сигналу, а отже його значення перестане бути фіксованим, і система зчитування невірно виділить корисний сигнал. Було запропоновано створити на кожному інформаційному шарі периферійні зони, в межах яких мають бути сформовані доріжки, подібні до інформаційних, які однак не нестимуть корисної інформації, а лише даватимуть ФЛ-сигнал, що дорівнює за значенням сигналу зчитування інформаційної області шару. Розрахунки показали, що загальна площа периферійних зон залежить від числової апертури системи зчитування і, наприклад, для формату оптичного диска, що характеризується зовнішньою та внутрішньою периферійною зонами, не перевищує 2 % від загальної площі зони запису.

Як модельний об'єкт реєструвального середовища ФЛ-запису в даній роботі пропонується розглядати синтезовані органічні наноструктуровані люмінофори на основі оранжево-червоного люмінофора (4-[1,5-дифеніл-2-піразолініл-3]-*n*-феніл-нафталіміда). Плівки люмінофорів були отримані шляхом поливу відповідних розчинів із використанням центрифуги на скляні підкладки. Товщина нанесених плівок складала близько 1 мкм. Розчини люмінофорів готувалися за наступною схемою [6–8]:

- піразолінові люмінофори розчинялись у толуолі;
- отримані розчини вносились до матриць на основі політетілметакрилата або полістиролу (5 % від основної компоненти люмінофорів);
- структурування люмінофорів відбувалося через його внесення в матрицю білого цеоліту.

Частина люмінофорів також було розчинено в лаку, стійкому до дії ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Було зауважено, що наноструктура інформаційного шару РММ-носія може призвести до появи у реєструвальному ФЛ-середовищі квантово-розмірних ефектів. З метою перевірки даного припущення було проведено ряд експериментів з уведення піразолінових люмінофорів до матриці білого цеоліту, що характеризується субмікронними та нанометровими порами.

Експериментальне дослідження показало, що піразолінові люмінофори характеризуються великим значенням квантового виходу ФЛ ($\eta = 60\text{--}70\%$), що важливо при зчитуванні ізотропного ФЛ-сигналу, низьким часом релаксації ФЛ, який дозволяє зчитувати дані зі швидкістю, характерною для відбивальних оптичних дисків, можливістю варіювати спектром ФЛ за рахунок введення домішок, високим рівнем поглинання в короткохвильовій області оптичного діапазону, достатньою фоточутливістю до запису локальним знебарвленням через теплове руйнування люмінофора та великим значенням стоксового зсуву $\Delta\lambda$ для відокремлення ФЛ-сигналу та сигналу, відбитого від поверхні диска. Параметри синтезованих люмінофорів наведено в табл. 1. Квантово-хімічний розрахунок [6–8] електронного спектра подібного роду люмінофорів показує, що за ФЛ відповідає $\pi\text{-}\pi^*$ -електронний перехід з великою силою осцилятора, де π^* — збуджений стан π

електрона. Також необхідно відзначити, що у формуванні видимої області спектрів ФЛ σ -електрони не приймають безпосередньої участі, оскільки частоти квантів, що поглинаються, при переходах цих електронів лежать у глибокій області УФ-зони. Широкий діапазон світіння обумовлений тим фактом, що випромінювальний перехід відбувається з нижніх рівнів збудженої молекули люмінофора на деякий континуум коливальних рівнів не збудженої молекули. Положення максимуму ФЛ визначається механізмом взаємодії молекул люмінофора з навколишніми молекулами матриці.

Таблиця 1. Оптичні параметри наноструктурованих піразолінових люмінофорів

Піразоліновий люмінофор	Стоксів зсув	Час релаксації ФЛ	Поглинання на довжині хвилі $\lambda = 405$ нм
59M	245 нм	100 нс	22 %
59HM	250 нм	80 нс	21 %
59HC	210 нм	90 нс	23 %
53SM	135 нм	55 нс	25 %
53SC	170 нм	65 нс	24 %

Уведення піразолінових люмінофорів до матриці цеоліту і, таким чином, розділення блоку люмінофору на нанорозмірні частинки, призвело до того, що частина заборонених електронних переходів у його структурі стали частково дозволеними. При цьому експериментальне дослідження показало збільшення рівня основного піку ФЛ і зменшення часу релаксації ФЛ. Подальше покращення характеристик реєструвального середовища стало можливим після його лазерного відпалу в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні, що сприяло проникненню люмінофора у менші пори цеоліту (табл. 2).

Таблиця 2. Оптичні параметри наноструктурованих люмінофорів

Піразоліновий люмінофор	Зменшення піку ФЛ внаслідок опромінення	Зростання піку ФЛ-люмінофора		Зменшення часу релаксації ФЛ-люмінофора	
		до відпалу	після відпалу	до відпалу	після відпалу
59M	40 %	27 %	61 %	13 %	39 %
59HM	61 %	19 %	43 %	21 %	47 %
59HC	44 %	28 %	47 %	33 %	45 %
53SM	52 %	38 %	55 %	36 %	55 %
53SC	49 %	45 %	63 %	22 %	29 %

Перед тим як синтезовані люмінофори були запропоновані як реєструвальні середовища високостабільних носіїв інформації, була проведена перевірка стабільності їхніх оптичних характеристик. Вирішення цієї задачі є важливою при синтезі та застосуванні наноструктурованих люмінофорів, наноматеріали часто виявляють тенденцію до втрати оптичної однорідності внаслідок руху та скупчення наночастинок. Експериментальні дослідження синтезованих зразків показали, що

структура ФЛ-спектра та спектра поглинання зразків реєструвальних середовищ залишалася стабільною протягом 15-20 років від моменту синтезу. Така стабільність пов'язана з тим, що положення наночастинок у даному випадку фіксується матрицею цеоліту, так само як у випадку РММ-носія буде фіксуватися мікрорельєфом інформаційного шару. За тих самих причин оптичні характеристики локально знебарвленого люмінофору та люмінофору після ІЧ лазерного відпалу залишилися незмінними.

Моделювання процесу багат шарового ФЛ-запису інформації

Основою для побудови математичної моделі в даному випадку слугує формула для сфокусованого променя, в якому розподіл електричного поля та випромінювання в поперечному перетині апроксимується функцією Гауса [6, 7]:

$$I(r, z) = \frac{|E(r, z)|^2}{2\eta} = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right), \quad (1)$$

де $I(r, z)$ — усереднена за часом функція розподілу інтенсивності; $E(r, z)$ — амплітуда електричного поля; η — хвильовий опір; I_0 — інтенсивність у фокусі променя; ω_0 — радіус кружка Ейрі; z — вертикальна відстань до фокальної площини; r — радіальна відстань від перпендикуляру до фокальної площини. При цьому $\omega(z)$ обраховується як

$$\begin{cases} \omega(z) = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + (1/z_R)^2} \\ z_R = \pi\omega_0^2 / \lambda \end{cases}, \quad (2)$$

де λ — довжина хвилі лазерного пучка, яким здійснюється запис інформації.

Після коригування даної математичної моделі відповідно до особливостей системи оптичного запису задача пошуку оптимальних параметрів РММ-носія була зведена до математичної задачі пошуку максимумів і мінімумів цільових функцій. Як цільові функції виступали наступні параметри системи зчитування даних:

- загальна інформаційна ємність носія, що є добутком ємності окремого інформаційного шару та кількості шарів;
- надійність відтворення даних, що складається з показників, контрастності сигналу та співвідношення сигнал-шум (SNR: Signal-Noise Ratio);
- рівень корисного сигналу та чутливість системи зчитування до похибок, що виникають при формуванні інформаційного шару носія;
- чутливість системи зчитування до похибок, що виникають при формуванні інформаційних елементів.

У той же час аргументами даних цільових функцій є:

- лінійні розміри інформаційного елемента;
- товщина проміжного шару;
- коефіцієнт поглинання інформаційного елемента;
- коефіцієнт ФЛ інформаційного елемента;
- коефіцієнт заломлення підкладки, інформаційного та проміжного шарів;

- довжина хвилі зондувального променя;
- числова апертура оптичної системи зчитування.

Ключовим елементом системи пошуку оптимального рішення при розробці багат шарового ФЛ-запису інформації є алгоритм аналізу функції розподілу інтенсивності сфокусованого лазерного променя для оптичних систем. На рис. 1 показано результати моделювання для відомих оптичних систем, які можна обрати за точку відліку (з урахуванням особливостей ФЛ-запису). Далі через поступову зміну окремих параметрів РММ-носія та оптичної системи зчитування будується багатовимірна цільова функція, екстремуми якої і відповідатимуть оптимальним рішенням у розробці системи багат шарового ФЛ-запису інформації.

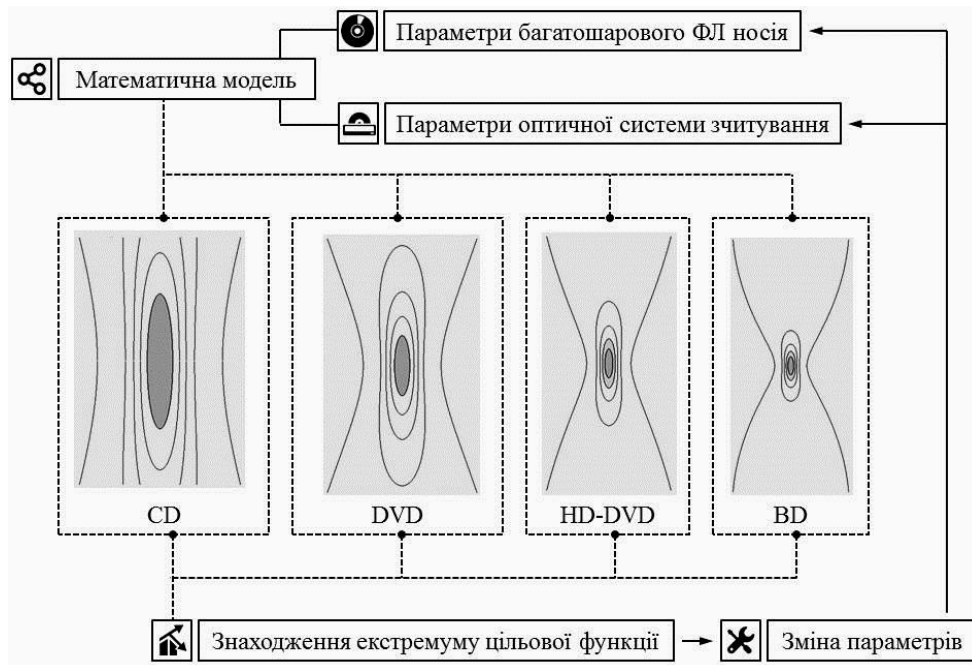


Рис. 1. Комплексна схема аналізу параметрів системи багат шарового ФЛ-запису інформації

На виході алгоритму, що моделює процес зчитування даних з інформаційних шарів РММ-диска отримуються наступні значення:

I_{SN} — ФЛ-амплітуда сигналу при фокусуванні зондувального променя на піті (сума корисного та паразитного сигналу);

I_N — ФЛ-амплітуда сигналу при фокусуванні зондувального променя на ленті (паразитний сигнал);

ΔI_{SN}^{\max} — максимальне відхилення у амплітуді сигналу при фокусуванні зондувального променя на піті.

Отриманні дані було переведено у формат показників, що більш наочно відображають параметри системи (рис. 2):

$k_S = (I_{SN} - I_N) / I_S^{\max}$ — показник корисного сигналу як співвідношення корисного сигналу до максимально можливого I_S^{\max} , що виникає при фокусуванні на піті першого інформаційного шару;

$k_C = (I_{SN} - I_N) / I_{SN}$ — показник контрастності як співвідношення корисного сигналу усередненого значення ФЛ-сигналу, що отримує система зчитування;
 $k_{SNR} = I_{SN} / \Delta I_{SN}^{\max}$ — показник SNR як співвідношення корисного сигналу випадкової похибки, що не може бути виділена при зчитуванні.

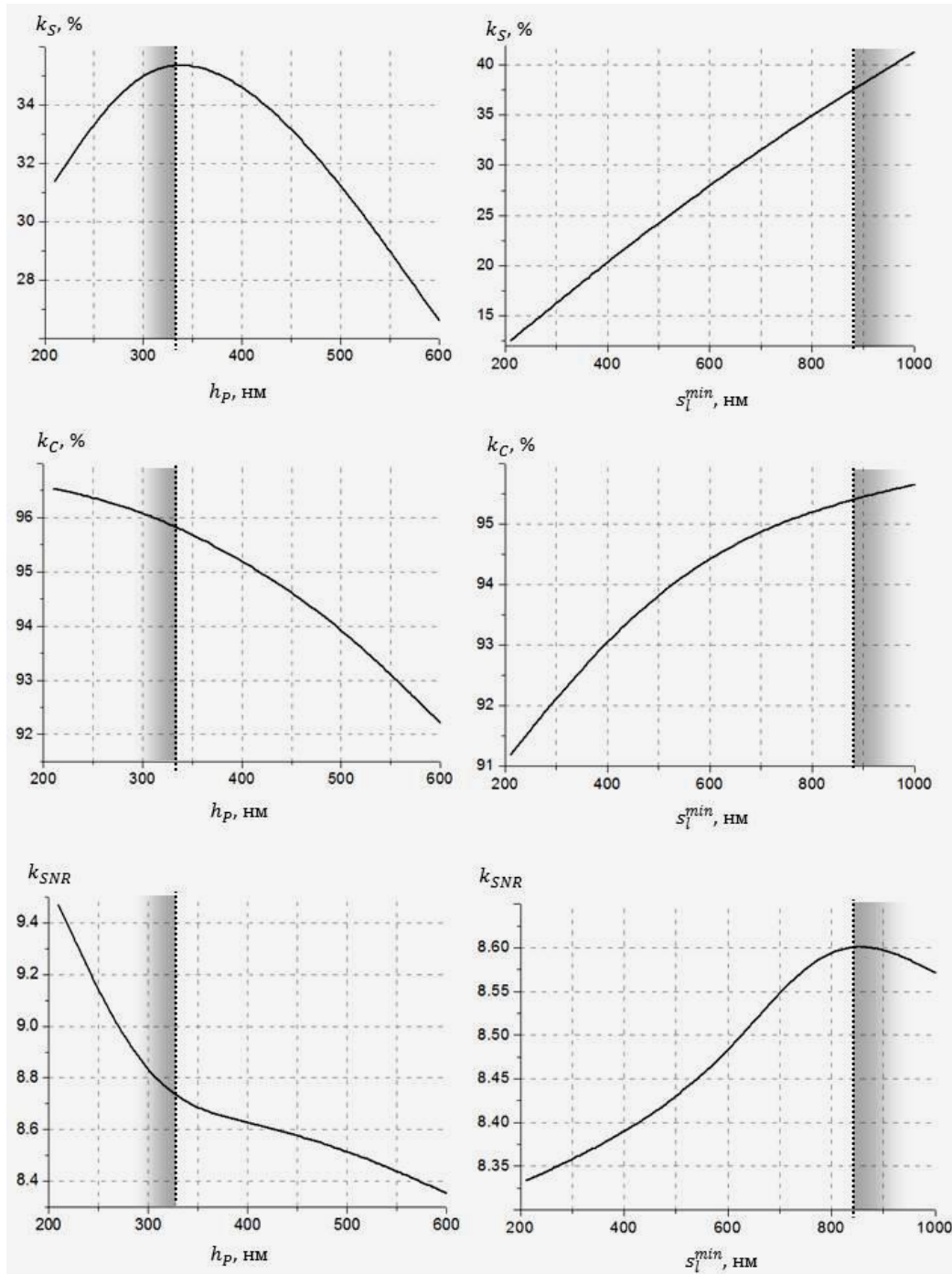


Рис. 2. Визначення оптимальних значень глибини піта та ширини ленда відповідно до показників корисного сигналу, контрастності та SNR

У рамках даної роботи розглянуто визначення на основі запропонованого алгоритму оптимальних значень глибини піта та мінімальної довжини ленда для оптичної системи зчитування типу «Blu Ray» ($\lambda \approx 405$ нм, $NA \approx 0,85$ нм). Результати, що представлені на рис. 2 (ліворуч наведено графіки визначення оптимальних значень глибини піта, праворуч — графіки визначення оптимальних значень ширини ленда), вказують на локальний максимум для показника корисного сигналу при $h_p \approx 340$ нм. При цьому, за умов подальшого зменшення цього значення, яке призведе до зменшення рівня поглинання лазерного променя інформаційним шаром, можна отримати збільшення показників контрастності та SNR. Аналогічно, при визначенні оптимального значення мінімальної довжини ленда s_l^{\min} було отримано локальний максимум для показника SNR $s_l^{\min} \approx 820$ нм. У даному випадку збільшення показників корисного сигналу та контрастності можливо при збільшенні значення s_l^{\min} . Таким чином, наведені коефіцієнти дозволяють для систем багат шарового ФЛ запису інформації конкретизувати поняття надійності відтворення даних і на математичному рівні сформулювати поняття відповідної цільової функції.

Висновки

Проведено аналіз обмежень зі збільшення щільності оптичного запису інформації. Указано, що подальший розвиток у цій галузі слід пов'язувати з методиками об'ємного оптичного запису, в першу чергу — методами побудови багат шарових фотолюмінесцентних носіїв інформації.

Як модельний об'єкт реєструвального середовища фотолюмінесцентного запису запропоновано розглядати органічні люмінофори на основі оранжево-червоного люмінофора. Синтезовано клас наноструктурованих реєструвальних середовищ на основі даного люмінофора, показано можливість покращення його характеристик шляхом лазерного відпалу.

Запропоновано математичну модель, за допомогою якої можна в автоматичному режимі визначити оптимальні параметри структури носія інформації та електрооптичної схеми пристрою зчитування через зведення даного завдання на рівень математичної задачі пошуку максимумів цільових функцій інформаційної ємності та надійності відтворення даних.

1. Kallepalli D.L., Alshehri A.M., Marquez D.T., Andrzejewski L., Scaiano J.C., & Bhardwaj R. Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics. *Scientific Reports*. 2016. **6**(1). doi:10.1038/srep26163.

2. Riesen N., Pan X., Badek K., Ruan Y., Monro T.M., Zhao J., Riesen H. Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals. *Optics Express*. 2018. **26**(9). 12266. doi:10.1364/oe.26.012266.

3. Полимерный материал для оптической записи информации на основе прекурсоров флуоресцирующих соединений и способ получения этих соединений. Пат. РФ 2 643 951. Травень В.Ф., Долотов С.М., Иванов И.В., Чепцов Д.А., Мамиргова З.З., Барачевский В.А. 2018.

4. Kazansky, P. G., Cerkauskaitė, A., Drevinskas, R., & Zhang, J. Eternal 5D optical data storage in glass. *Optical Data Storage*. 2016. doi:10.1117/12.2240594

5. Tanaka Y., Ogata T., & Imagawa S. (2014). Decoupling direct tracking control system for super-multilayer optical disk. *Optical Data Storage* 2014. doi:10.1117/12.2064244
6. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М., Кравець В.Г., Косско І.О., Беляк Є.В., Лапчук А.С., Костюкевич С.О. Надщільний оптичний запис інформації /від. ред. О.Г. Додонов. Київ: Національна академія наук України. Інститут проблем реєстрації інформації, 2009. 282 с. ISBN 966-00-0400-1
7. Petrov V.V., Zichun Le., Kryuchyn A.A., Shanoylo S.M., Fu M., Belyak Ie.V., Manko D.Yu., Lapchuk A.S., Morozov E.M. Long-term storage of digital information. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. 148 p. ISBN 978-966-360-360-5. doi: <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.360.148>
8. Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Belyak Ie.V., Lapchuk A.S. Multi photon microscopy and optical recording. Kyiv: Akadempriodyka, 2016.
9. Roden J.A., Gedney S.D. Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2000. No 27. P. 334–339.
10. Rylander T., Bondeson A. Stable FDTD-FEM hybrid method for Maxwell's equations. *Computer Physics Communications*. 2000. **125**. P. 75–82.

Надійшла до редакції 17.12.2018